

ESTABELECIMENTO DE UMA REDE GEODÉSICA PARA O MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO NA USINA HIDRELÉTRICA SALTO CAXIAS

*Stablishing a geodetic network for structure monitoring: a study case at Salto
Caxias Dams*

DANIEL CARVALHO GRANEMANN
PEDRO LUIS FAGGION
CARLOS AURÉLIO NADAL
LUIS AUGUSTO KOENIG VEIGA
SILVIO ROGÉRIO CORREA DE FREITAS

Universidade Federal do Paraná
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Setor de Ciências da Terra – Departamento de Geomática
Curitiba – Paraná – Brasil.

RESUMO

O monitoramento geodésico de barragens é de fundamental importância tendo em vista que problemas estruturais podem representar prejuízos econômicos, danos ao meio ambiente e em casos extremos a perda de vidas. Neste trabalho são apresentados os estudos para o estabelecimento de uma rede geodésica para o monitoramento da barragem formadora do reservatório da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias bem como as metodologias desenvolvidas para a realização das observações de campo e processamento dos dados. No contexto foram aplicados diferentes métodos de levantamentos, tais como: triangulações, trilaterações, nivelamento geométrico e rastreamento GPS (*Global Positioning System*), cada um deles com um propósito específico dentro do projeto de monitoramento da estrutura. Uma rede composta por seis vértices geodésicos de controle foi projetada e estabelecida na região da barragem. As coordenadas dos respectivos vértices foram determinadas em diferentes épocas, sendo estas obtidas de dados coletados nas campanhas realizadas (ângulos, distâncias e desníveis) aplicando-se ajustamento pelo Método de Variação de Coordenadas. Alguns testes como o *Data Snooping*, utilizado para a detecção de erros grosseiros nas observações, foram aplicados. A

meta central foi o de constatar a rigidez da rede geodésica, uma vez que esta será referência para posterior monitoramento da estrutura da barragem.

Palavras-Chaves: Redes Geodésicas; Ajustamento; Monitoramento.

ABSTRACT

The Geodetic instrumentation of dams are very important to monitore this kind of structure because problems with the dams can represent economical damages, enviromental problems, and the worst situation lost of human lives. The main objectives of this work are to stablish a geodetic network for monitoring the Salto Caxias Dam, develop methodologies for collecting field data, and to present estrategies for data processing. In this work, different survey techniques were applied, such as: triangulation, trilateration, precision geometric levelling and GPS (Global Positioning System) observation, each one with a specific aim inside in the monitoring project. A net with six control points were projected and stablished in the region of the dam, and the point coordinates were obtained at different periods of time. The data collected in the surveying campaigns were processed by using the least squares principles inside the Coordinate Variation Method. There were also applied some statistical tests like Data Snooping Test for the blunders detection. The final purpose in establishing the refered network was to have to have a geodetic rigid reference structure for moniting the time beahavior of the dam.

Key words: Geodetic Networks; Adjustment; Monitoring.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento geodésico é uma ferramenta fundamental no controle de deslocamentos absolutos em grandes obras de engenharia. Nas barragens, em conjunto com a instrumentação física de monitoramento constitui-se do subsídio para a análise de comportamento da estrutura como elemento auxiliar na prevenção de acidentes.

Neste trabalho são descritos os critérios utilizados na implantação de uma rede geodésica a montante da barragem de Salto Caxias, objetivando avaliar os deslocamentos desta estrutura e a estabilidade da rocha sobre a qual está construída esta barragem. Para tal, implantaram-se 6 pilares de concreto. Três na margem direita e três na margem esquerda do rio Iguaçu. Estes pilares foram construídos especificamente para o trabalho e contêm no seu topo um sistema de centragem forçada.

Utilizando os pilares como vértices da rede, são realizados levantamentos geodésicos empregando métodos como triangulação, trilateração e posicionamento com satélite através do GPS (Global Positioning System), com o intuito de determinar as coordenadas planimétricas dos pilares da rede. Também foi efetivada a análise do comportamento geométrico da rede ao longo do tempo. Para tanto, foram realizadas duas campanhas por ano, uma no final do verão e outra no final do

inverno, a fim de se verificar a estabilidade da rede geodésica, uma vez que esta fica exposta às intempéries, como chuva, sol, calor, e outros elementos, e a partir desta poder-se analisar os movimentos da barragem.

2. INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

O monitoramento de barragens tem importância fundamental, uma vez que vidas e prejuízos materiais podem acontecer. Sabe-se que o rompimento de uma barragem acaba por inundar cidades, destruindo casas, ocasionando perdas inestimáveis e danos econômicos a toda uma região. O monitoramento e a instrumentação de barragens ganharam importância em meados da década de 50. Desde então há um contínuo avanço nos instrumentos e métodos utilizados para a auscultação de barragem.

No ano de 1979, durante o XIII Internacional Commission on Large Dams (ICOLD), em Nova Delhi, decidiu-se dar uma maior atenção à segurança de barragens. Naquela época já eram conhecidas ocorrências de diversos incidentes com graves consequências, devidos principalmente ao aumento nas dimensões das novas barragens, o envelhecimento das existentes e o aumento da quantidade deste tipo de estrutura, sendo construídas em países com pouca ou nenhuma experiência na área. Viu-se então, a necessidade de normas e diretrizes que regulamentassem o monitoramento das barragens existentes e as futuras.

Uma iniciativa brasileira deu origem a considerações que levaram a criação, em 1982, do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGD). No ICOLD, o Brasil ocupa a presidência do Subcomitê encarregado da elaboração de Diretrizes de Segurança de Barragens destinadas ao uso em âmbito mundial.

Em 1996 e 1997 o CBGB, com a Comissão de Deterioração e Reabilitação de Barragens, elaborou minuta de portaria nº 739, do Ministério de Minas e Energia, criando o Conselho Nacional de Segurança de Barragens. Depois disso, o Ministério criou um grupo de trabalho a fim de elaborar um documento para normalizar procedimentos preventivos e de manutenção com relação à segurança das diversas barragens existentes. Ao final de 1998 o núcleo de São Paulo do CBGB finalizou o “Guia Básico de Segurança de Barragens”, contendo padrões e procedimentos para a orientação dos proprietários de barragens quanto à segurança das mesmas. Atualmente não há legislação específica no Brasil para as atividades de segurança de barragem, apenas um projeto de lei a ser aprovado, que consiste no Manual de Segurança do Ministério da Integração (EMAE, 2004).

Segundo CHEN (1983), os métodos aplicados ao monitoramento de barragens, objetivando a segurança da região ao seu entorno, podem ser assim classificados:

a) Métodos geodésicos convencionais

- redes geodésicas de monitoramento: absoluta e relativa;
- redes horizontais de monitoramento: redes de triangulação, trilateração e poligonação;

- movimentos verticais: nivelamento geométrico de primeira ordem.

b) Método fotogramétrico

- terrestre.

c) Projetos especializados

- extensômetros e interferômetros;
- medidas de inclinação: nivelamento hidrostático, clinômetro eletromecânico e eletrolítico, alinhamento vertical (pêndulo mecânico ou prumo óptico);
- alinhamento a laser.

d) Técnicas espaciais:

- VLBI - Very Long Baseline Interferometry;
- GPS - Global Positioning System.

Como já mencionado, este trabalho está pautado na aplicação de métodos geodésicos convencionais, entre eles a triangulação e trilateração geodésica buscando a determinação das coordenadas dos vértices de uma rede geodésica. Na sequência, serão abordados com ênfase estes métodos.

3. REDE GEODÉSICA DE MONITORAMENTO

De acordo com NIEMEIER (1981), o projeto de redes geodésicas deve ser dividido em ordens:

- Projeto de Ordem Zero: definição do sistema de referência ideal;
- Projeto de Primeira Ordem: escolha da melhor localização para as estações da rede;
- Projeto de Segunda Ordem: escolha das observações a serem realizadas, bem como seus respectivos níveis de precisão;
- Projeto de Terceira Ordem: melhoria ou otimização da rede pré-existente.

Na implantação da rede Geodésica junto à usina de Salto Caxias seguiram-se também as orientações de KUANG (1996).

- Referencial:

Não há problema de projeto de ordem zero nas redes de monitoramento. No caso de redes de referência, os deslocamentos são determinados comparando-se as coordenadas obtidas em campanhas distintas. Assim, o problema está em se confirmar a estabilidade da rede de referência;

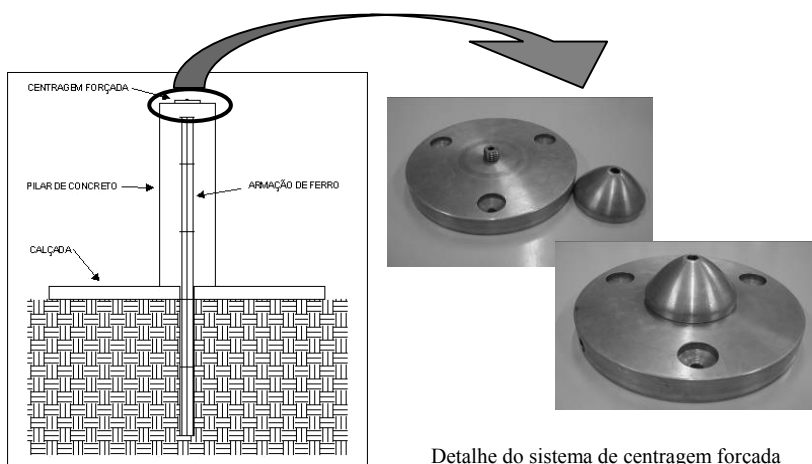
- Pré-análise:

No projeto de primeira ordem, a geometria da rede foi concebida em função da topografia local e da forma da estrutura a ser monitorada. Nas redes de referência os pontos de controle devem estar situados fora da área sujeita às deformações, ao passo que os pontos a serem monitorados devem estar devidamente distribuídos dentro dessa mesma área.

realizou-se uma visita para a escolha da localização dos pontos onde foram construídos os pilares da rede. Para esta escolha levou-se em consideração a topografia do terreno, a facilidade de acesso, a estabilidade do solo e a visibilidade entre pontos.

Para a materialização da rede utilizaram-se pilares de concreto armado, engastados na rocha a jusante da barragem, conforme a figura 2. Estes foram dotados de um sistema de centragem forçada que materializa os vértices da rede geodésica. Sua função é garantir a reocupação destes com precisão superior aos movimentos a serem detectados, e servir de base para a execução das irradiações aos pontos de monitoramento implantados, tais como aqueles junto às fissuras da barragem. De acordo com NADAL (2000), a estimativa de repetibilidade na reocupação do ponto é da ordem do décimo de milímetro.

Figura 2 - Esquema dos Pilares da Rede e Sistema de Centragem Forçada.

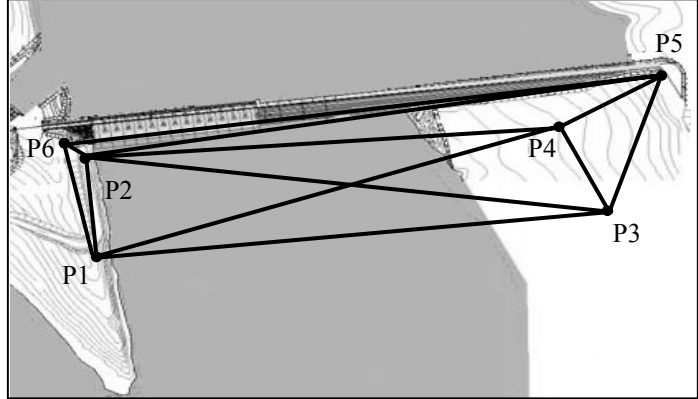


Detalhe do sistema de centragem forçada

3.1.3. Configuração da Rede de Monitoramento

Na figura 3 observa-se, em planta, a configuração da rede de monitoramento após a monumentação dos pilares, sendo P1, P2, P3 e P4 pertencentes à rede geodésica principal, e P5 e P6 auxiliares, que serviram de apoio ao monitoramento interno da barragem, através de poligonal enquadrada nas galerias de inspeção. Aos interessados neste assunto sugere-se o trabalho de ZOCOLLOTTI FILHO (2005).

Figura 3 – Configuração da Rede de Monitoramento (em Planta).



FONTE: NADAL et al. (2004).

4. MEDIÇÕES REALIZADAS NA REDE DE MONITORAMENTO

4.1. Determinação da Geometria d Escala da Rede

A primeira campanha para a determinação das características geométricas da rede, ou seja, o levantamento propriamente dito, foi realizada em outubro de 2004, e uma segunda campanha em maio de 2005.

Para a obtenção das direções utilizou-se o Método de Séries de Pares Conjugados, que consiste em se realizar observações das direções em ambas a posições da luneta (direta e indireta) repetidas vezes, formando assim séries de observações. Para tanto, o Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) disponibilizou as estações totais Wild TC 2002 (LEICA, 1994), Zeiss Elta S20 (TRIMBLE, 2001), Leica TCRA 1205 (LEICA, 2005), e acessórios. As precisões destes equipamentos, e o número de séries de observação que foram realizadas, podem ser visualizados na tabela 1.

Tabela 1 – Número de Séries em Relação à Precisão do Instrumento.

ESTAÇÃO TOTAL	PRECISÃO NOMINAL		NÚMERODE SÉRIES DE OBSERVAÇÕES
	ANGULAR	LINEAR	
TC-2002	0,5''	± (1 mm + 1 ppm)	3
Elta S20	3''	± (3 mm + 3 ppm)	4
TCRA 1205	5''	± (2 mm + 2 ppm)	4

Realizaram-se, então, a trilateração e triangulação na rede de monitoramento, sendo as distâncias medidas em ambos os sentidos, ou seja, de P3 – P4 (estação em P3 e refletor em P4) e de P4 – P3 (estação em P4 e refletor em P3), e as direções em seis séries de observação.

Durante a realização das séries angulares, foram adotados dois critérios para o aceite das observações. O primeiro foi o critério para a verificação de leituras efetuadas através de pares conjugados (PD e PI).

Definiu-se que tanto para direções angulares quanto para ângulos zenitais a tolerância para a diferença entre as leituras em PD e PI seria de três vezes a precisão nominal do equipamento. Observações que excederam esta tolerância foram retiradas da amostra e novas observações foram realizadas. Como segundo critério, durante o cálculo dos ângulos horizontais e zenitais médios através das séries de observação, valores calculados que diferiram mais que 3σ eram descartados e nova média calculada. O processo de verificação era então repetido.

De posse das direções observadas tornou-se possível calcular os ângulos internos do quadrilátero formado pelos pilares P1, P2, P3 e P4 da rede principal de monitoramento, ângulos estes apresentados na tabela 2.

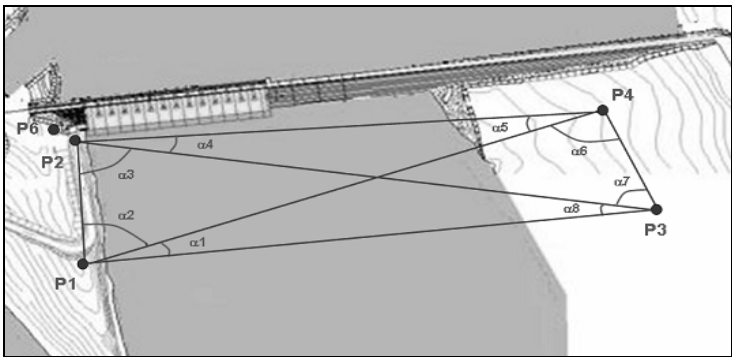
Tabela 2 – Ângulos Internos do Quadrilátero Formado Por P1, P2, P3 e P4. Comparação Entre Ângulos Observados pela TC 2002 (Precisão 0.5'') e Zeiss Elta S20(Precisão 3'').

ÂNGULOS OBSERVADOS	ESTAÇÃO TOTAL			
	TC 2002		ELTA S20	
	Média	σ	Média	σ
α_1	19° 14' 36,7''	0,6''	19° 14' 36,8''	0,9''
α_2	85° 49' 46,2''	0,4''	85° 49' 48,2''	0,5''
α_3	74° 05' 15,6''	0,4''	74° 05' 18,3''	0,6''
α_4	20° 46' 45,5''	0,7''	20° 46' 42,3''	0,6''
α_5	18° 38' 32,2''	0,2''	18° 38' 32,5''	0,9''
α_6	68° 01' 35,9''	0,5''	68° 01' 40,9''	0,9''
α_7	56° 17' 00,2''	0,7''	56° 17' 05,1''	0,9
α_8	17° 06' 25,5''	0,4''	17° 06' 27,5''	0,0

Observa-se através do desvio padrão dos ângulos que a estação Elta S20, apesar de uma precisão nominal inferior da TC2002, apresentou os desvios das médias aproximadamente iguais. Uma explicação para este fato é a melhor qualidade do sistema de focalização da estação total Elta S20, que permite uma melhor definição da imagem do alvo no momento da pontaria.

Na figura 4 visualiza-se a rede com a indicação dos ângulos da tabela 2. Esta configuração foi utilizada para analisar a estabilidade da estrutura onde está localizada a barragem.

Figura 4 -Indicação dos Ângulos – Rede de Monitoramento.



FONTE: Adaptado DE (GRANEMANN, 2005)

As distâncias entre os pilares da rede são apresentadas na tabela 3. A trilateração foi realizada somente com a TC 2002, visto ter precisão linear de $\pm 1\text{mm} + 1\text{ppm}$.

Tabela 3 – Distâncias Entre os Pilares P1, P2, P3 E P4 – Tc 2002.

DIST. HORIZ.	(m)	PRECISÃO (mm)
P1P2	214,645	1,21
P1P3	581,872	1,58
P1P4	670,348	1,67
P2P3	602,867	1,60
P2P4	622,698	1,62
P3P4	205,773	1,20

5. AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES APLICADO A REDES GEODÉSICAS

5.1. Método de Variações das Coordenadas

Para a definição das coordenadas dos vértices da rede empregou-se o Método de Variação de Coordenadas, que é a aplicação do MMQ paramétrico ao ajustamento de uma triangulação, onde as coordenadas finais dos vértices são obtidas no próprio processo de ajuste, conhecidos valores iniciais das mesmas (GEMAEL, 1994). As incógnitas a serem determinadas nada mais são que as correções a serem aplicadas às coordenadas provisórias dos vértices para a obtenção das coordenadas finais.

A aplicação deste método não se restringe ao ajustamento de triangulações,

podendo também ser aplicado às trilerações, poligonais e combinações destes processos de levantamento.

O conhecimento das coordenadas aproximadas dos vértices da rede foi obtido, no caso, com cálculo topográfico. Na sequência são apresentadas as equações de observação e as equações normais. Estas podem ser escritas em função dos ângulos internos da rede, dos azimutes das direções formadas entre os vértices da rede e das distâncias entre estes mesmos vértices.

Equação de Distância:

$$\left(\frac{X_i - X_j}{IJ}\right)_o dx_i + \left(\frac{Y_i - Y_j}{IJ}\right)_o dy_j + \left(\frac{X_i - X_j}{IJ}\right)_o dx_j + \left(\frac{Y_i - Y_j}{IJ}\right)_o dy_j = K_{ij} + V_{ij} \quad (01)$$

Equação de Azimute:

$$\rho \left(\frac{Y_i - Y_j}{IJ^2}\right)_o dx_i + \rho \left(\frac{X_j - X_i}{IJ^2}\right)_o dy_i + \rho \left(\frac{Y_j - Y_i}{IJ^2}\right)_o dx_j + \rho \left(\frac{X_i - Y_j}{IJ^2}\right)_o dy_j = K_{ij} + V_{ij} \quad (02)$$

Equação de Ângulo:

$$\begin{aligned} &\rho \left(\frac{Y_i - Y_B}{IB^2}\right)_o dx_B + \rho \left(\frac{X_B - X_i}{IB^2}\right)_o dy_B + \rho \left(\frac{Y_B - Y_j}{IB^2} - \frac{Y_F - Y_i}{IF^2}\right)_o dx_i + \rho \left(\frac{X_i - X_B}{IB^2} - \frac{X_i - X_F}{IF^2}\right)_o dy_i \\ &+ \rho \left(\frac{Y_F - Y_i}{IF^2}\right)_o dx_F + \rho \left(\frac{X_i - X_F}{IF^2}\right)_o dx_F = K_{BIF} + V_{BIF} \end{aligned} \quad (03)$$

Neste trabalho, a partir das equações (01) e (02), aplica-se o método paramétrico, cujo modelo matemático é expresso pela equação 04 (GEMAEL, 1994):

$$F(X_a) = L_a \quad (04)$$

Este modelo indica que os valores ajustados são funções explícitas dos parâmetros ajustados, quais sejam as coordenadas planimétricas dos pontos. Maiores informações sobre o assunto podem ser encontrados em GEMAEL (1994); FAGGION (2001); WOLF e GHILANI (2002).

O sistema de equações normais é expresso por:

$$A^T P A X + A^T P L = 0 \quad (05)$$

Isolando X, obtém-se:

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (06)$$

Onde:

X: vetor das correções às coordenadas aproximadas (parâmetros);

A: matriz das derivadas parciais das funções angulares e de distância em função das coordenadas aproximadas dos pontos da rede (parâmetros);

P: matriz dos pesos das observações;

L: vetor da diferença entre os valores calculados e observados das distâncias e azimutes.

As coordenadas ajustadas são apresentadas pela seguinte equação:

$$X_a = X_o + X \quad (07)$$

Onde:

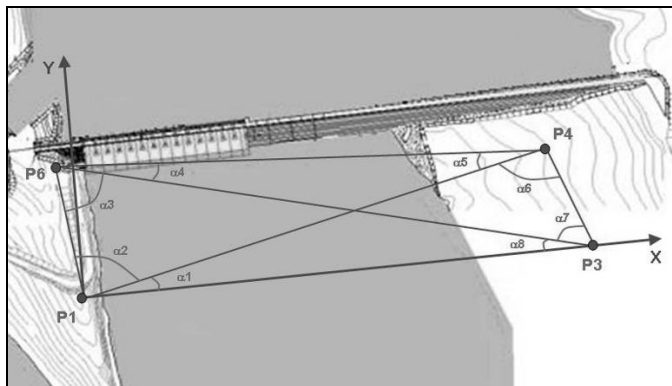
X_a – vetor das coordenadas ajustadas;

X_o – vetor das coordenadas aproximadas.

5.2. Estabelecimento do Sistema Arbitrário Local da 1ª e 2ª Campanhas

De posse das observações sobre os quatro pilares da rede de monitoramento com as estações totais Wild TC 2002 e Zeiss Elta S20, realizou-se o ajustamento, utilizando um sistema de referência (X,Y) local, com origem no Pilar P1, coordenadas ($x = 1000,000$ m; $y = 1000,000$ m), eixo X orientado positivamente na direção P1-P3 e eixo Y orientado positivamente em direção ao muro da barragem, formando um sistema dextrógiro conforme ilustrado na figura 6.

Figura 5. Sistema de Referência Local.



Dessa forma, a coordenada x do Pilar P3 é igual à distância entre os pilares P1 e P3 somada à coordenada x do Pilar P1, ou seja, $x_3 = 1000,000$ m + $581,848$ m = $1581,848$ m, e a coordenada y do Pilar P3 é igual a do Pilar P1, ou seja, $y_3 = 1000,000$ m.

Fixadas a origem do sistema de referência local e a orientação dos eixos X e Y, não há, portanto, derivação das funções de distâncias e ângulos em relação às coordenadas (x, y) do Pilar P1 e em relação à coordenada (x) do Pilar P3. Assim, foram determinadas, via ajustamento de observações, as correções às coordenadas (x, y) do Pilar P2, coordenada (y) do Pilar P3 e coordenadas (x, y) do Pilar P4, totalizando cinco parâmetros a determinar.

As coordenadas aproximadas para os pilares P1, P2, P3 e P4 são apresentadas no tabela 4.

Tabela 4 – Coordenadas Aproximadas Dos Pilares.

PILAR	COORDENADA (EM METROS)	
	x	y
P1	1000,000	1000,000
P2	1018,210	1213,860
P3	1581,848	1000,000
P4	1640,660	1197,170

5.3. Testes com a Matriz dos Pesos da 1ª e 2ª Campanhas

Realizaram-se testes com a matriz dos pesos, os quais são demonstrados na sequência.

1º teste: sendo a matriz dos pesos definida como a precisão nominal linear do equipamento - $\pm (1\text{mm} + 1 \text{ ppm})$ - para as distâncias e número de séries de observações para os ângulos.

2º teste: matriz dos pesos igual a matriz identidade.

3º teste: matriz dos pesos definida como matriz identidade para os ângulos e precisão nominal linear do equipamento para as distâncias.

Os resultados obtidos pelos testes para as coordenadas dos pilares, bem como os seus respectivos desvios-padrões, são apresentados no tabela 5.

Tabela 5 – Coordenadas dos Pilares – Testes com Matriz dos Pesos – TC 2002.

TC 2002						
COORD. PILARES	1º TESTE (m)	σ (mm)	2º TESTE (m)	σ (mm)	3º TESTE (m)	σ (mm)
X₂	1018,211	0,03	1018,211	0,03	1018,211	0,03
Y₂	1213,870	0,02	1213,870	0,03	1213,870	0,02
Y₃	1581,864	0,02	1581,864	0,02	1581,864	0,02
X₄	1640,682	0,03	1640,682	0,03	1640,682	0,03
Y₄	1197,188	0,02	1197,188	0,03	1197,188	0,02

Analisando-se a tabela 5 percebe-se que não houveram variações significativas

nas coordenadas dos pilares com os três conceitos de matriz dos pesos empregados. Isto era esperado, pois o peso não influencia no cálculo das coordenadas, mas sim na determinação da qualidade do ajustamento, como pode ser entendido da equação 07.

Optou-se por utilizar a matriz dos pesos do 1º teste, uma vez que este é mais comumente encontrado nas literaturas consultadas.

5.4. Determinação das Coordenadas Corrigidas

As coordenadas corrigidas dos pilares, bem como os seus respectivos desvios-padrões, são apresentados e comparados no tabela 6. As estações totais empregadas na primeira (1ª) e segunda (2ª) campanhas são diferenciadas nesta tabela.

Tabela 6 – Comparação entre as Coordenadas Corrigidas dos Pilares.

COORD	TC 2002				ELTA S20		TCRA 1205	
	1º	σ	2º	σ	1º	σ	2º	σ
	(m)	(mm)	(m)	(mm)	(m)	(mm)	(m)	(mm)
X ₂	1018,215	0,09	1018,211	0,03	1018,215	0,10	1018,213	0,17
Y ₂	1213,871	0,06	1213,870	0,02	1213,871	0,07	1213,871	0,12
Y ₃	1581,872	0,07	1581,864	0,02	1581,872	0,08	1581,867	0,14
X ₄	1640,690	0,08	1640,682	0,03	1640,690	0,09	1640,684	0,16
Y ₄	1197,188	0,07	1197,188	0,02	1197,188	0,08	1197,188	0,14

Os valores de sigma *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$) para os ajustamentos das observações realizadas pelas estações totais são apresentados no tabela 7.

Tabela 7 – Comparação entre Sigma a Posteriori.

ESTAÇÕES TOTAIS	$\hat{\sigma}_0^2$
TC 2002 (1ª campanha)	3,1217 x 10 ⁻⁹
TC 2002 (2ª campanha)	3,6586 x 10 ⁻⁴
Elta S20	3,6814 x 10 ⁻⁹
TCRA 1205	2,6712 x 10 ⁻³

6. APLICAÇÃO DO TESTE DE QUI-QUADRADO (χ²)

Para a análise dos valores de sigma *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$), aplicou-se o teste de qui-quadrado (χ²) unilateral, com nível de significância 1%.

Hipótese Básica: $H_0: \hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$

Hipótese Alternativa: $H_1: \hat{\sigma}_0^2 < \sigma_0^2$

χ^2 calculado:

$$\chi^2 = (\hat{\sigma}_0^2 / \sigma_0^2) \cdot (n - u) \quad (08)$$

Para a primeira campanha com a TC 2002:

$$\begin{aligned} \chi^2 &= (3,1217 \times 10^{-9}) \cdot (14 - 5) \\ \chi^2 &= 28,09 \times 10^{-9} \end{aligned} \quad (09)$$

χ^2 teórico (com $\alpha = 1\%$):

$$\begin{aligned} 1 - \alpha &= 1 - 0,01 = 0,99 \\ \chi^2 &= 21,67 \end{aligned} \quad (10)$$

Como o valor calculado para χ^2 é menor que o valor de χ^2 teórico, a hipótese básica não é aceita ao nível de significância de 1%. Isto ocorre para todas as

estações totais utilizadas, pois os valores de $\hat{\sigma}_0^2$ são da ordem de 10^{-3} , 10^{-4} e 10^{-9} .

Como o valor de $\hat{\sigma}_0^2$ é obtido com a equação 8, e os resíduos são pequenos, seu

valor também será, quando comparado com σ_0^2 (igual a 1). Isso indica que as observações de distâncias e direções, utilizadas no processo de ajustamento para a obtenção das coordenadas dos vértices da rede, são de alta precisão, em virtude das precisões nominais das estações totais utilizadas e da acuidade visual do observador, que para todas as campanhas foi o mesmo.

7. APLICAÇÃO DO TESTE DATA SNOOPING

Trata-se de um teste aplicado às observações realizadas, com o intuito de verificar a presença de erros grosseiros, como por exemplo, erros de anotação e troca de números na digitação da caderneta.

7.1. Erro Observacional

De acordo com Moraes (2001), a relação entre resíduos de observações e erros observacionais é dada por:

$$v_i = - (Q_v P)_{ii} \cdot e_i \quad (11)$$

onde:

- V_i : resíduo da observação;
- Q_v : matriz dos coeficientes de peso dos resíduos v_i ;
- P : matriz diagonal dos pesos das observações;
- e_i : erro observacional;
- ii : índices do i-ésimo elemento da diagonal da matriz.

Do ajustamento das observações obtém-se a matriz Q_v , dada por:

$$Q_v = \frac{1}{\sigma_0^2} \Sigma V \quad (12)$$

onde:

ΣV : matriz variância-covariância dos resíduos obtida no ajustamento.

7.2. Número-Redundância

De acordo com MORAES (2001), dá-se o nome de número-redundância ao i-ésimo elemento da diagonal da matriz $(Q_v P)$, adimensional, dado por:

$$r_i = \left((Q_v P)_{ii} = \frac{1}{\sigma_0^2} (\Sigma V P)_{ii} \right) \quad (13)$$

A seguir são apresentados os respectivos números-redundâncias (r_i); somente a diagonal principal da matriz e resíduos-padronizados (w_i) para o teste de Data Snooping aplicado ao resultado do ajustamento, com as observações obtidas com a estação total ELTA S10.

O intervalo de confiança de r_i é dado por $0 \leq r_i \leq 1$. Se $r_i = 0$, então o ajustamento não é confiável, caso contrário, se $r_i = 1$, então o ajustamento é de máxima confiabilidade.

Vetor dos Resíduos Padronizados:

$$w = \begin{pmatrix} -0.000096248 \\ -0.000005314 \\ -0.000013571 \\ 0.000115341 \\ 0.000003793 \\ 0.000027305 \\ 0.000045328 \\ -0.000038936 \\ -0.000036116 \\ -0.000025281 \\ 0.000026758 \\ 0.000036574 \\ -0.000027168 \\ -0.000027934 \end{pmatrix}$$

7.4. Teste de Hipótese

Pressupondo-se que w_i tem distribuição normal, realizou-se o teste:

H_0 : nenhum erro grosseiro presente na observação.

Esta hipótese é rejeitada se $|w_i| > k$, sendo k o valor crítico conforme nível de confiança específico.

A escolha deve ser feita de forma que a probabilidade α de erro do tipo I (rejeição de H_0 quando verdadeira) e a probabilidade β de erro do tipo II (aceitação de H_0 quando falsa) sejam as menores possíveis.

A tabela 8 apresenta alguns níveis de confiança e seus respectivos valores críticos, de acordo com MORAES (1997).

Tabela 8 – Níveis de Confiança e Valores Críticos – Teste *Data Snooping*.

1 - α	K	1 - β
99,9 %	3,29	76%
99,7 %	3,00	84%
99,0 %	2,56	93%
95,0 %	1,96	98%

Comparando-se os valores dos resíduos padronizados com os valores de k da tabela 8, verificou-se que a hipótese H_0 não é rejeitada para nenhum dos níveis de significância.

Nos tabelas seguintes são apresentadas as comparações entre as coordenadas horizontais dos pilares da rede de monitoramento, obtidas pelo processo de ajustamento para cada uma das estações.

São comparadas as coordenadas entre a primeira campanha realizada com a Wild TC 2002 e Zeiss Elta S20, apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 – Comparação entre Coordenadas Horizontais – TC 2002 (1ª) e ELTA S20.

COORD. PILARE S	TC 2002 (1ª) (EM METROS)	ELTA S20 (EM METROS)	DIFERENÇAS ENTRE COORDENADAS (EM METROS)
X₂	1018,215	1018,215	0,0000
Y₂	1213,871	1213,871	0,0000
Y₃	1581,872	1581,872	0,0000
X₄	1640,690	1640,690	0,0000
Y₄	1197,188	1197,188	0,0000

A segunda comparação, entre a segunda campanha realizada com a Wild TC 2002 e Zeiss Elta S20, é apresenta na tabela 10.

Tabela 10 – Comparação entre Coordenadas Horizontais – TC 2002 (2ª) e ELTA S20

COORD. PILARE S	TC 2002 (2ª) (EM METROS)	ELTA S20 (EM METROS)	MÓDULO DAS DIFERENÇAS ENTRE COORDENADAS (EM METROS)
X₂	1018,211	1018,215	0,0000
Y₂	1213,870	1213,871	0,0005
Y₃	1581,864	1581,872	0,0073
X₄	1640,682	1640,690	0,0077
Y₄	1197,188	1197,188	0,0005

A terceira comparação, entre a segunda campanha realizada com a Wild TC 2002 e Leica TCRA 1205, é apresenta na tabela 11.

Tabela 11 – Comparação entre Coordenadas Horizontais – TC 2002 (2ª) e TCRA 1205.

COORD. PILARES	TC 2002 (2ª) (EM METROS)	TCRA 1205 (EM METROS)	MÓDULO DAS DIFERENÇAS ENTRE COORDENADA S
			(EM METROS)
X₂	1018,211	1018,213	0,0000
Y₂	1213,870	1213,871	0,0005
Y₃	1581,864	1581,867	0,0073
X₄	1640,682	1640,684	0,0077
Y₄	1197,188	1197,188	0,0005

As diferenças entre as coordenadas horizontais obtidas pelo processo de ajustamento para a segunda campanha realizada com as estações totais Wild TC 2002 – precisão angular: $\pm 0,5''$; e linear: $\pm (1\text{mm} + 1\text{ ppm})$ - e Leica TCRA 1205 - precisão angular: $\pm 5''$; e linear: $\pm (2\text{mm} + 2\text{ ppm})$ - podem ser explicadas pelas diferenças entre suas precisões nominais e pelo sistema de alvos utilizado na medida das direções horizontais. Com a Wild TC 2002 utilizaram-se alvos específicos para a medida de direções, e com a Leica TCRA 1205 prismas refletores.

8. CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos pelo ajustamento de observações pelo método de variação de coordenadas, pode-se verificar que o monitoramento de barragens utilizando métodos geodésicos fornece dados precisos e confiáveis sobre a real condição estrutural de uma obra deste porte. Desta forma é perfeitamente viável e justificável a implantação de uma rede de monitoramento geodésico para controle de deslocamentos estruturais, sendo esta o referencial para garantir resultados precisos e de confiança.

Empregando as três opções de teste para a matriz dos pesos constatou-se que isto não afeta o vetor das coordenadas corrigidas, porém influencia significativamente na aplicação de testes estatísticos. Assim, optou-se por utilizar a matriz dos pesos definida como a precisão nominal linear do equipamento - $\pm (1\text{ mm} + 1\text{ ppm})$ - para as distâncias e número de séries de observações (3) para os ângulos, uma vez que este é mais consagrado.

9. AGRADECIMENTOS

Ao Projeto CGER 032 – Integração da Auscultação Geodésica com a

Instrumentação de Controle e Segurança da Barragem de Salto Caxias, registrado no BANPESQ sob o nº. 2003013088, em convênio com a Universidade Federal do Paraná (UFPR), Companhia Paranaense de Energia (COPEL), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), pelos recursos financeiros da bolsa de estudos do mestrado e apoio às campanhas necessárias a coleta de dados;

Ao CNPq, pelo benefício da Lei 8010/90, no auxílio para a aquisição da Estação Total Leica TCRA 1205;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COPEL *Companhia Paranaense de Energia. Geração – Usinas Hidroelétricas.*

Disponível em: <<<http://www.copel.com/PagCopel.nsf/13feda93e8fef9d203256a77005d0926/be9d34467aaf883403256b760042e91f?OpenDocument>>
> Acesso em: 09 fev. 2004.

EMAE. *Empresa Metropolitana de Águas e Energia S. A.* Disponível em: <http://www.emaee.sp.gov.br>. Acesso em 20 nov. 2004.

FAGGION, P. L. *Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório.* Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 134f. 2001.

GEMAEL, C. *Introdução ao ajustamento de observações: Aplicações Geodésicas.* 1. ed. Curitiba: Editora UFPR. 1994.

GRANEMANN, D. *Estabelecimento de uma Rede Geodésica para o Monitoramento de estruturas: estudo de caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias.* Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

LEICA. *User Manual TCRA 1205.* Heerbrugg, 2005.

LEICA. *User Manual Wild TC2002.* Heerbrugg, 1994.

MORAES, C. V. DE. *Aplicação do Ajustamento às Poligonais.* Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1997.

MORAES, C.V. *Aprimoramento da concepção do modelo Geodésico para a caracterização de extremas no espaço geométrico.* (Tese de Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésica, UFPR, 277pp. 2001.

NADAL, C. A. *Método da Interseção Óptica Tridimensional Aplicado à Engenharia de Precisão.* (Tese de Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

NADAL, C. A., VEIGA, L. A. K., FAGGION, P. L., FREITAS, S. R. C. DE, ZOCCOLLOTTI FILHO, C. A., GRANEMANN, D. C., LOPES, C. R., SANTOS, D. P. DOS. *Integração da Auscultação Geodésica com a*

Instrumentação de Controle e Segurança da Barragem de Salto Caxias. Relatório Técnico, Universidade Federal do Paraná, 2004.

TRIMBLE. *Trimble Zeiss Elta S User Guide*. Ohio: Dayton, 2001.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. *Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics*. 10th ed. Prentice Hall. P. 418-425. 2002.

ZOCOLLOTI FILHO, C. A. *Utilização de Técnicas de Poligonação de Precisão para o Monitoramento de Pontos Localizados em Galerias de Inspeção: Estudo de Caso da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias*. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

(Recebido em março/07. Aceito em maio/08)